УДК 631.453

Реализация целей ООН в области устойчивого развития по реабилитации почв, загрязненных тяжелыми металлами: новые тенденции и направления на будущее (обзор)

Махмуд Мазарджи [1], Мухаммад Тукур Байеро [1,2], Татьяна Минкина [1], Светлана Сушкова [1], Саглара Манджиева [1], Андрей Терещенко [1], Ридван Кизилкая [2], Джошкун Гелзер [2]
[1] Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия; mahmoudmazarji@gmail.com
[2] Университет Ондокуз Майис, Сумсун, Турция

DOI: 10.18522/2308-9709-2021-37-4

Аннотация:
Ремедиация тяжелых металлов (ТМ) в почве в настоящее время является важной темой. Влияние загрязненной почвы с канцерогенным, мутагенным и тератогенным потенциалом может привести к серьезным последствиям для здоровья. В настоящее время быстрый рост урбанизации, населения и уровня жизни требует поиска устойчивых решений в эпоху пост-covid-19. Эти многочисленные потенциальные преимущества, особенно в сочетании с биочаром, производимым из различной биомассы, могут стать экологически полезным инструментом для достижения целей ООН в области устойчивого развития по более экологичному восстановлению почв. В этом контексте был рассмотрен метод получения биочара из различного сельскохозяйственного сырья и его использование в качестве добавки в почву для восстановления земель, загрязненных тяжелыми металлами. Кроме того, нанокомпозиты на основе биочара, которые содержат функциональные материалы, в последнее время вызывают большой интерес из-за уникальных свойств, возникающих по причине их наноразмеров, и являются перспективными с точки зрения реакционной способности и стабильности. С другой стороны, полезность и эффективность этих нанокомпозитов на основе биочара определяются их способностью адаптироваться к конкретным условиям местности и особенностям почвы. Этот обзор эффективно обобщает текущие достижения в области применения биочара для восстановления загрязненных почв, включая тяжелые металлы, поскольку полной оценки использования нанокомпозитов на основе биоугля не существует. Обсуждены также перспективы использования и возможности внедрения нанокомпозитов на основе биочара в загрязненных почвах.

Ключевые слова: биочар, наноматериалы, тяжелые металлы, загрязнение почв, ремедиация почв.

Мазарджи Махмуд , Мухаммад Тукур Байеро, Минкина Т. М., Сушкова С. Н., Манджиева С. С., Терещенко А. А. , Ридван Кизилкая, Джошкун Гелзер, Реализация целей ООН в области устойчивого развития по реабилитации почв, загрязненных тяжелыми металлами: новые тенденции и направления на будущее (обзор) // «Живые и биокосные системы». – 2021. – № 37; URL: https://jbks.ru/archive/issue-37/article-4/. DOI: 10.18522/2308-9709-2021-37-4

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

Eng. *Implementing the UN sustainable development goals for greener remediation of soils contaminated with heavy metals: new trends and directions for the future*

Mahmoud Mazarji[1], Muhammad Tukur Bayero[2], Tatiana Minkina[1], Svetlana Sushkova[1], Saglara Mandzhieva[1], Andrey Tereshchenko[1], Rıdvan Kızılkaya[2], Coşkun Gülser[2]
[1] *Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation*
[2] *Ondokuz Mayıs University, Samsun, 55080, Turkey*

DOI: 10.18522/2308-9709-2021-37-4

Abstract:
The remediation of heavy metals (HMs) in the soil is always an important topic. Exposure to contaminated soil with carcinogenic, mutagenic, and teratogenic potential can result in serious health effects. Nowadays, rapid growth in urbanization, population, and living standards call for a finding sustainable solutions during the post-COVID-19 era. These numerous potential advantages, especially integrated with biochar produced from various biomass, might provide an ecologically beneficial tool for achieving the United Nations' sustainable development objectives for greener soil remediation. In this context, the biochar preparation method from different agricultural feedstock and its use as a soil amendment for remediation of HMs-contaminated were discussed. Furthermore, biochar-based nanocomposites containing functional materials have lately attracted much interest because of the unique properties emerging from their nanoscale size compartment, which present a good promise in terms of reactivity and stability. The utility and potency of these biochar-based nanocomposites, on the other hand, are determined by their ability to adapt to particular site circumstances and soil qualities. This overview effectively summarizes the current advances in the application for the remediation of polluted soils including HMs, since there is no complete assessment of the uses of biochar-based nanocomposites. Future views on the usage and possibilities for deploying biochar-based nanocomposites in polluted soils were discussed.
Keywords: biochar, nanomaterials, heavy metals, contaminated soil, soil remediation

Введение

Почвы обеспечивают основные потребности человека, такие как продовольствие, чистая вода и чистый воздух, и выступают в качестве основы для биоразнообразия. Устойчивость почв в двадцать первом веке зависит не только от практики управления фермерами, лесниками и землеустроителями, но и от правительственных решений по законам и нормативным актам, маркетингу и субсидиям [15]. Усиление антропогенного воздействия на природную среду привело к серьезным глобальным проблемам на стыке планетарного и общественного здоровья, самым последним проявлением которых может быть COVID-19. COVID-19 имеет много параллелей с климатическим кризисом. Эпидемия и изменение климата являются потенциально катастрофическими глобальными проблемами, которые требуют немедленного вмешательства правительств [21]. Изучение политических решений, принятых во время эпидемии COVID-19, может помочь улучшить усилия по борьбе с глобальным изменением климата и подготовить человечество к будущим бедствиям [10].

В настоящее время быстрый рост урбанизации, численности населения и уровня жизни играет решающую роль в увеличении образования сельскохозяйственных отходов, что требует устойчивого решения в эпоху *пост-covid-19*. Эти проблемы побуждают научных исследователей в области изучения экосистем тесно взаимодействовать с политиками для установления значимых целей для приспособления, которые приносят пользу как людям, так и экосистемам, на которые они полагаются [39]. Это видение согласуется с целью ООН в области устойчивого развития, и может столкнуться с постоянно растущим давлением в пользу более чистой окружающей среды и более высокого качества на глобальном уровне [37]. Были обнаружены различные экологически приемлемые стратегии устойчивого управления почвами, направленные на решение этой проблемы [32]. Среди различных подходов для *пост-covid-19* предпочтительнее приспособление стратегии решения, основанной на природе [36], поскольку преобразование исходного сырья отходов в почвенную среду смягчило бы последствия изменений климата в необходимых масштабах и темпах.

Важность решения, основанного на природе, была признана 141-м компонентом адаптации из 167-и определяемых на национальном уровне взносов (NDCs), представленных в Рамочной конвенцию ООН об изменении климата всеми сторонами Парижского соглашения. В общей сложности 103 страны включают NBS в компонент адаптации своих NDC, 76 стран – в компоненты адаптации и смягчения последствий, а 27 стран включают их исключительно в свои планы смягчения последствий. Другими словами, 130 стран, или 66 % всех подписавших Парижское соглашение, заявили о своей приверженности тому, чтобы каким-либо образом взаимодействовать с

экосистемами для устранения причин и последствий изменения климата [2, 30].

Как указывалось, ранее, в связи с важностью экологических и экономических показателей, преобразование исходного сырья в материалы предоставляет множество возможностей для смягчения последствий изменения климата. Несколько видов отходов исходного сырья, таких как кокосовая койра, шелуха подсолнечника, рисовая шелуха, жмых сахарного тростника, скорлупа земляного ореха и т.д., могут служить исходным сырьем для изготовления биочара (рис. 1). Эти различные потенциальные преимущества, в сочетании с тем фактом, что биочар, полученный из широкого спектра биомассы, потенциально может быть экономически эффективным методом преобразования отходов в полезный и ценный материал [43]. Кроме того, преобразованные отходы в биочар являются экологически выгодным инструментом для реализации целей ООН по устойчивому развитию по более экологичному восстановлению загрязненных почв.

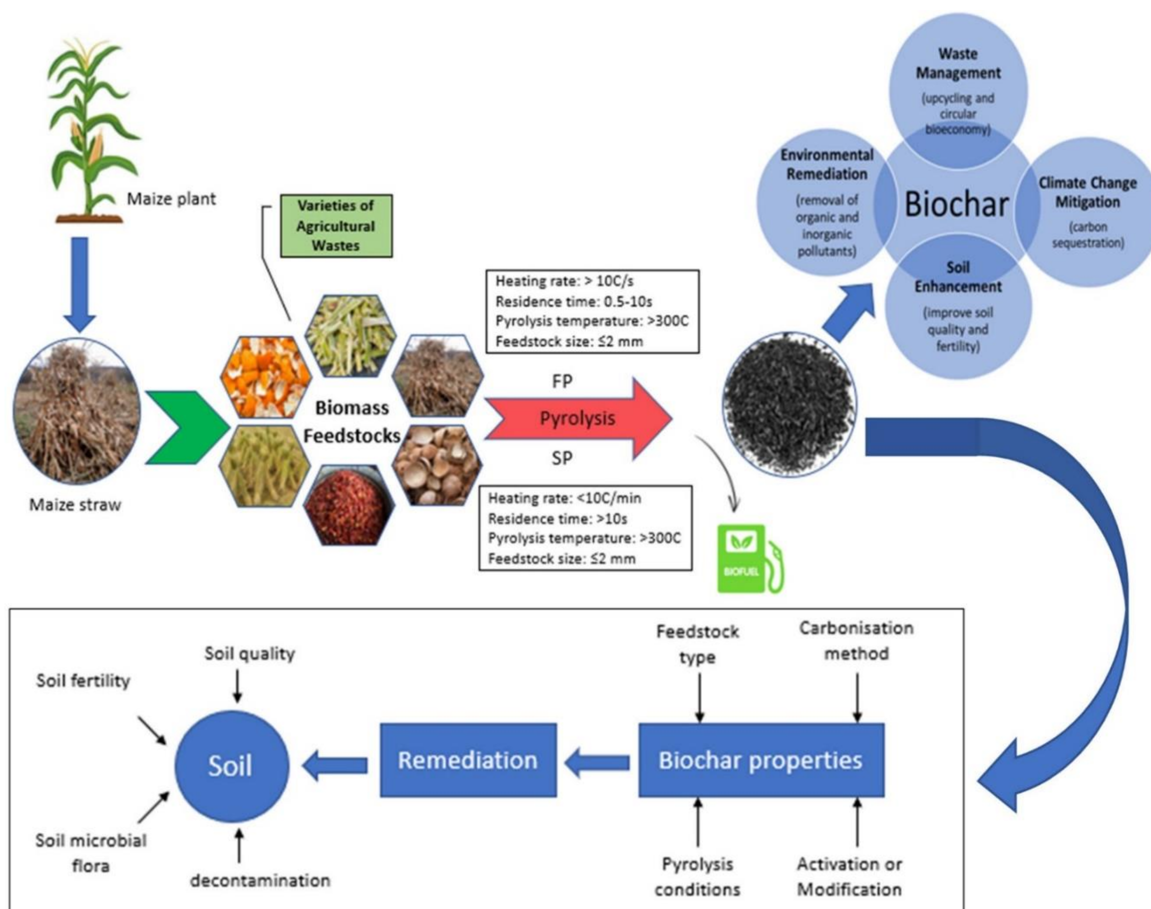


Рис. 1 – Преобразование биомассы сельскохозяйственных отходов в биочар для достижения целей устойчивого развития. Перепечатано из [1], Copyright © 2021, с разрешения Elsevier, Лицензия № 5191780431940.

Методы производства биочара

Биочар – это твердый органический остаток, полученный в результате пиролиза биомассы. Биочар может быть изготовлен в небольшом количестве с помощью горелки для приготовления пищи или в больших масштабах с использованием системы пиролиза. Пиролиз – это термохимический процесс, который преобразует биомассу в биочар при температурах от 350 до 700°C в отсутствие или ограниченном количестве кислорода [31]. Твердый продукт такого процесса, богатый углеродом, определяется как биочар, а летучая часть пиролиза частично конденсируется в жидкую фракцию, известную как смола или биомасло. Процессы пиролиза делятся на три категории в зависимости от условий: медленный пиролиз (медленные скорости нагрева в течение длительного времени, температуры ниже 300 °C), умеренный пиролиз (температуры от 300 до 500 °C) и быстрый пиролиз (высокие скорости теплопередачи за короткое время, температуры выше 500 °C) [24]. Согласно литературным данным [14, 20, 38], первичный крекинг и вторичный распад и образование функциональных групп кислорода начинаются примерно при температуре 400-500 °C во время пиролиза биомассы.

Использование разного исходного сырья привело к вариабельности таких характеристик биочара как: площадь поверхности, поры и функциональные группы, что влияет на его свойства. Рисовая шелуха, древесная кора, хвосты сахарной свеклы, кожура фруктов, сосновая древесина, древесные отходы и растительные остатки являются наиболее распространенным сырьем для производства биочара в сельскохозяйственном секторе [20, 38]. Понимание того, влияют ли исходные качества сырья на характеристики конечного биочара, имеет решающее значение для выбора исходного сырья. Было продемонстрировано, что сырье оказывает значительное влияние на формирование биочара с уникальными химическими характеристиками. Биочар на основе древесины содержит больше углерода и меньше доступных растениям питательных веществ, в то время как биочар на основе навоза имеет обратную тенденцию. Биочар на основе травы по своим характеристикам обычно находится между древесным и навозным биочарами. На эти характеристики, тем не менее, могут влиять температура пиролиза и метод, часто используемый для производства [16, 34].

Параметры пиролиза и исходное сырье оказывают значительное влияние на характеристики биочара; дополнительные переменные включают скорость теплообмена, температуру и период разложения [31]. Температура пиролиза влияет на структурные и физико-химические характеристики биочара, такие как площадь поверхности, структура пор, поверхностные функциональные группы и элементный состав. Выделение летучих веществ при высоких температурах может объяснить влияние температуры пиролиза на данные характеристики. По мнению многих исследователей [6, 17, 36], более

высокие температуры пиролиза приводили к большей площади поверхности биочара, более высокому pH и более высокому процентному содержанию углерода, но более низкому процентному содержанию азота. В результате выбор подходящей температуры пиролиза предполагает компромисс между заданной структурой поверхности и химическими характеристиками [6, 17, 36].

Потенциальная роль биочара в качестве улучшения почвы

Тяжелые металлы (ТМ) уже давно признаны серьезными загрязнителями окружающей среды, которые выделяются вследствие работы различных отраслей производства, включая сжигание угля, производство аккумуляторов, производство кожи и использование пестицидов [23]. Из-за своей высокой токсичности, канцерогенности и мобильности ТМ представляют собой серьезную опасность для здоровья людей [15]. Кроме того, в окружающей среде ионы тяжелых металлов могут находиться в разных состояниях, что приводит к более сложным и более токсичным загрязнениям. Эти загрязнители могут накапливаться в пищевых цепях, причиняя вред растениям, животным и людям (повреждение эндокринной системы, воздействие на иммунитет, неврологические расстройства и рак) [19].

Методы химической дезактивации тяжелых металлов, такие как выемка грунта, осаждение, термообработка, электроремедиация и химическое выщелачивание, по-прежнему дороги и зависят от загрязняющих веществ и свойств почвы [12]. Основные трудности и недостатки этих процедур включают изменение параметров почвы (особенно pH), возможность потери плодородия почвы, мелкомасштабное внесение и образование побочных продуктов [18]. С другой стороны, химические осадки дорого обходятся и могут вызвать вторичное загрязнение. Напротив, фиторемедиация имеет очень длительный рабочий период, и обработка отходов биомассы, содержащих металлы, по-прежнему является экологической проблемой [35]. В результате по-прежнему существует острая необходимость в создании эффективных, рентабельных и «зеленых» технологий, способных удалять большие количества тяжелых металлов.

Внесение биочара в почву существенно повлияло на плодородие почвы, изменив химические, биологические и физические свойства почвы [1]. Его использование в качестве удобрения почвы улучшает ее качество и развитие растений, что приводит к повышению урожайности сельскохозяйственных культур [29]. Ресурс биочара, метод производства, тип и состояние почвы, а также вид выращиваемой культуры могут повлиять на его эффективность [41].

Применение биочара для восстановления тяжелых металлов в почве

Основным направлением применения биочара в сельском хозяйстве на ранних этапах было внесение биочара в почву в качестве удобрения. Тем не менее, другие применения в инженерии по восстановлению окружающей среды могут быть столь же важны, как и почвенные методы [7]. Биочар может иметь широкий спектр физических и химических характеристик в зависимости от исходного сырья и процессов термохимической конверсии (пиролиза). Следовательно, эффективность биочара в различных областях применения сильно зависит как от производственных процессов, так и от состава исходного сырья [13]. Связь между характеристиками биочара, условиями производства и составом сырья должна быть определена, чтобы лучше понять текущее разнообразие доступных биочаров и последствий их использования в качестве искусственного материала [40]. С этой целью в таблице 1 представлено краткое изложение нашего текущего понимания влияния исходного сырья и процедур пиролиза на свойства биочара.

Высокий риск воздействия Cd (II) в почвах повышает способность металла переноситься и накапливаться в растениях и сельскохозяйственных культурах, а также его способность проникать в поверхностные и подземные воды и вызывать пагубные последствия для экосистем [8]. Для решения этой проблемы Chen et al. изучили влияние температуры пиролиза биочара на транспортировку Cd в насыщенной водой почве [9]. Они показали, что биочар, изготовленный при температуре 500°C, резко ингибирует транспорт Cd (II) при высокой ионной силе [9]. В другом исследовании биочар из биомассы сосновых опилок, полученный при 550°C, иммобилизировал больше Pb, чем биочар, полученный при 300°C (таблица 1). Кроме того, биочар, генерируемый при более высоких температурах, потенциально может быть более стабильным, что делает его пригодным для восстановления почв, загрязненных Pb, которые регулярно затопляются. При попадании в окружающую среду и такие элементы, как мышьяк, представляют серьезную угрозу для здоровья животных и человека. Биочар, полученный из кукурузной соломы, показал приемлемое сорбционное сродство к As (III). Более того, повышение pH после использования биочара может нейтрализовать кислую почвенную среду, что потенциально предотвращает подкисление красноцветной почвы [42].

Таблица 1 – Влияния исходного сырья и параметров пиролиза на свойства биочара.

Направлен-ность	Тип и зарактерис-тика	Тип био-чара	Условия пиролиза	Вклад биочара	Важные результаты	Ссыл-ка

исследования	загрязнения почвы					
Влияние температуры пиролиза на транспортировку Cd(II) в водонасыщенных почвах	Верхний слой – илистая суглинистая красная почва, содержащая Fe (47,0 г/кг) и Al (16,7 г/кг)	Пшеничная солома	350 и 500 °C в течение 2 ч в атмосфере N_2	Высокотемпературный биоуголь показал более высокое сродство к Cd (II).	Биочар, изготовленный при температуре 500 °C, резко ингибировал транспорт Cd (II) при высокой ионной силе.	[9]
Влияние биочара в на загрязненную почву	Верхний слой красной почвы (pH:5,42, ЦИК:5,90 смоль/кг, OM: 14,90 г/кг)	Кукурузная солома	600 °C в течение 2 ч в атмосфере N_2	Увеличение pH почвы за счет биоугля на 0,4 единицы потенциально уменьшит подкисление красной почвы.	Связи (Mn-O/As и Fe-O/As) улучшили поверхностную сорбционную способность для удаления As. Насыщенные кислородом функциональные группы, такие как OH, C=O, Si-O и особенно Mn-O, способствовали окислению As(III) до As(V) в загрязненных почвах.	[42]
Иммобилизация и видообразование Pb в OB условиях для внесения изменений в почву	Верхний слой супесчаной почвы сельскохозяйственных угодий (закрытый для золотого рудника) содержал	Сосновые опилки	300 и 550 °C (время пребывания - недоступно)	Было установлено, что биочары, полученные при более высоких температурах, более подходят для иммобилизации Pb в	Вариации динамических окислительно-восстановительных условиях были ограничены иммобилизацией Pb из-за, возможно, изменения OB	[5]

	(As:2047 мг/кг и Pb: 1680 мг/кг)			динамических ОВ условиях.	химий из-за резорбции Pb, растворен-ного в почве. Осаждение и комплексо-образование доступных функциональ-ных групп могут оказывать влияние на иммобилиза-цию Pb.	

Применение нанокомпозитов на основе биочара в восстановлении тяжелых металлов в почве

Синтез композитов на основе биочара открыл много новых возможностей как для биочара, так и для наноматериалов [44]. Функциональные группы, характеристики пор, участки поверхностной активности, способность к каталитическому разложению и простота разделения полученных композитов часто значительно улучшаются [l, 22]. Выявлено, что модификация биочара наноматериалами повышает его потенциальную способность к иммобилизации тяжелых металлов, превращая бионанокомпозит в эффективный сорбент тяжелых металлов в почвах (таблица 2).

Таблица 2 – Применение нанокомпозитов биочара в почвах, загрязненных тяжелыми металлами.

Направленность исследования	Тип и характеристика загрязненной почвы	Тип наноматери алов	Способ синтеза	Важный результат	Ссыл ка
Иммобилизация тяжелых металлов в сельскохозяйств енной почве	Почва с сельскохозяйств енных угодий, загрязненная Cd(II) 2,81 мг/кг и As(V) 60,23 мг/кг	Пористая магнитная биоугольна я сфера, загруженна я наночастиц ами гидратов Fe3O4 и FeCl2	одностадийное гелеобразован ие и пиролиз	Было обнаружено , что биодоступн ая фракция Cd и As(V) снижается с 1,55 до 0,32 мг/кг и с 1,26 до 0,85 мг/кг	[25]

				соответственно.	
Иммобилизация тяжелых металлов в кислых водах и почвах, подвергшихся воздействию шахт	Илисто-песчаная кислотная почва из рудника Cu, содержащая (Cu, Pb и Zn)	Хитозан и наноглина	После пиролиза была произведена пропитка суспензией хитозана/наноглины остаточной стружки коры биочара для получения однородного композита	Нанокомпозит адсорбировал Cu^{2+}, Pb^{2+} и Zn^{2+} на 121,5, 336 и 134,6 мг/г соответственно, что намного выше, чем у первичного биоугля. При 10 % мас./вт нанокомпозит уменьшал выщелачивание металла из почвы на Cu^{2+}:100 %, Zn^{2+}:100 % и Pb^{2+}:52,2 %	[3]
Интеграция оксида графена и нановалентного железа (nZVI) с биоуглем для иммобилизации Cu	Почва сельскохозяйственных угодий, обогащенная 386 мг/кг 488 мг/кг Cu	Графен и нано-железо с нулевой валентностью (nZVI)	После пиролиза пропитку графена и nZVI проводили с помощью методов постпиролиза и совместного осаждения, соответственно.	Композитный материал способствовал преобразованию доступного Cu в менее легкодоступный.	[28]
Синергетический эффект биоугля зеленого чая и nZVI	Почва сельскохозяйственных угодий, обогащенная 386 мг/кг Pb	Нано железо с нулевой валентностью (nZVI)	После пиролиза пропитку проводили методом совместного осаждения.	По сравнению с одним только биочаром зеленого чая и нетронутым	[41]

				nZVI нанокомпозит повысил эффективность иммобилизации PB на 19,38 % и 57,14 % соответственно.	
Магнитные биочары для иммобилизации тяжелых металлов в многозагрязненной почве	Рисовая почва загрязнена Cd, Cu, Zn и Pb с общим содержанием 1,4 мг/кг, 80 мг/кг, 1638 мг/кг и 2463 мг/кг, соответственно	Fe3O4/биочар	После пиролиза пропитку биочара проводили методом постпиролиза и совместного осаждения.	В почвах, измененных магнитным композитом, растворимый в кислоте Cd был на 8-10 % ниже, чем в контрольной загрязненной почве.	[25]

В связи с этим была синтезирована пористая сфера биочара на магнитной основе для повышения эффективности иммобилизации биочара. Композит биочара продемонстрировал отличные характеристики флотации и магнетизма, которые в конечном итоге, благодаря добавлению воды в почву, заставили сферы покинуть почву и всплыть на поверхности смеси почвы и воды. Электростатические взаимодействия между сферами биочара и тяжелыми металлами были ответственны за процесс иммобилизации [25].

После пиролиза остаточной щепы коры при 600 °C была проведена пропитка хитозаном/наноглиной биоуглерода для получения однородного композита для одновременной иммобилизации ионов металлов Cu, Pb и Zn в загрязненной почве. Нанокомпозит препятствовал выщелачиванию Cu^{2+}, Pb^{2+} и Zn^{2+} на 100, 52,29 и 100 % соответственно, что намного выше, чем у первичного биочара [3]. Согласно исследованию Mandal et al. (2020), присоединение наночастиц nZVI и оксида графена к биочару позволило избежать агрегации и быстрого окисления при сохранении активной реакционной способности nZVI и обеспечении стабильности. Целые кислотные функциональные группы биочара обеспечивают эффективный pH и pHzpc, которые играют важную роль в иммобилизации Cu в почве. На поверхности древесного угля образуются однородные частицы nZVI с квазисферическими центрами, окруженными тонким слоем носителя из

оксида графена. После 14 дней инкубации биочар/оксид графена-nZVI существенно снизил доступное содержание Cu в почве и снизил биодоступность Cu [27].

Большинство зарегистрированных биочаров не пригодны для повторного использования и сопряжены с риском высвобождения иммобилизованных компонентов после кратковременной иммобилизации. Для решения проблемы, как упоминалось ранее, в качестве потенциального материала для иммобилизации Pb в почве был исследован биочар из нано-нулевого валентного железа (NZVI) зеленого чая, полученный при температуре 450 °C. Композит показал площадь поверхности 38,08 $м^2/г$, средний размер частиц nZVI ~0,12 мкм и намагниченность насыщения 0,24 Am^2/kg, что привело к получению суперпарамагнитного композита. Последовательные исследования экстракции показали превращение Pb в оксиды после 30 дней эксперимента, что указывает на многообещающую возможность иммобилизации тяжелых металлов в почве [26]. Аналогичным образом, Fan et al. (2020) использовали пиролиз смеси опилок и Fe_2O_3 в одном котле для усиления иммобилизации для встраивания nZVI в биочар. Подвижность As в почве была снижена по сравнению с первоначальной обработкой биочаром. Это явление может быть вызвано адсорбцией As и совместным осаждением на поверхности биочара, вызванным образованием коррозии nZVI (аморфный FeOOH). Кроме того, после сорбции nZVI-BC большая часть As (V) была восстановлена до As (III) [11]. Yu et al. (2015) создали модифицированный наноразмерный MnO_2 композит из биочара, отличный адсорбент As (III) в красной почве. Удельная площадь поверхности композита резко уменьшилась, когда наночастицы MnO_2 осаждались в порах биочара. As (III) реагирует с кислородсодержащими функциональными группами, образуя множество связей Mn-O/As и Fe-O/As, как показано инфракрасной спектроскопией с преобразованием Фурье (FTIR) и XPS анализом. Оксид MnO2 и Fe-Mn частично окисляют адсорбат As (III) до As (V) [42]. В другом исследовании для иммобилизации Cd и Pb в глинистой почве применялось пористое наноразмерное железо с нулевой валентностью на основе биочара (BC-nZVI). С помощью биочара-nZVI была достигнута одновременная иммобилизация Cd и Pb, и доступность как Cd, так и Pb была резко снижена. Кроме того, были созданы стабильные виды Cd, такие как $Cd(OH)_2$, $CdCO_3$ и CdO, в то время как были получены стабильные виды Pb, такие как $PbCO_3$, PBO и $Pb(OH)_2$, что предполагает одновременную иммобилизацию Cd и Pb в почве [33].

Lu et al. (2018) показали, что температура пиролиза, выбор исходного сырья или намагниченность играют глоавенствующую роль в определении сорбционной емкости биочара. Выбор подходящей температуры пиролиза и исходного сырья был более актуальным, чем намагничивание, для предотвращения выщелачивания Cd, Pb и Zn [25].

Перспективы и проблемы

Для использования биочара для удовлетворения постоянно растущего спроса остается несколько ограничений и проблем, которые указаны ниже.

1) Биочар использовался в качестве многофункциональной платформы для поглощения тяжелых металлов. Однако необходимо синтезировать новые уникальные материалы на основе наноматериалов для разработки функциональных композитных материалов, позволяющих снизить производственные затраты и повысить эффективность и производительность удаления для повышения экономической эффективности. Кроме того, для учета возможных вторичных загрязнений, образующихся при изготовлении нанокомпозитов из биочара, необходимо разработать более “зеленые” методы синтеза для достижения высокоэффективной и долговременной модели удаления тяжелых металлов. Дальнейшие исследования процессов формирования могут помочь в улучшении характеристик нанокомпозитов из биочара с целью повышения эффективности удаления тяжелых металлов.

2) Для повышения эффективности и производительности удаления тяжелых металлов необходимо всестороннее исследование точных процессов удаления различных тяжелых металлов. Из-за наличия сложных компонентов в загрязненной почве часто встречаются многочисленные тяжелые металлы и другие органические микрозагрязнители. Чтобы повысить потенциал и практичность использования нанокомпозита биочара для удаления тяжелых металлов из загрязненной почвы, необходимо дополнительно изучить конкурирующие процессы адсорбции многочисленных тяжелых металлов на наноразмерном биочаре, содержащем металлы. Синтезированные нанокомпозиты биочара могут демонстрировать разные возможности удаления в различных почвенных условиях из-за ограниченных активных участков и взаимодействующей связи между тяжелыми металлами и растворенным органическим веществом. Для удовлетворения требований практического применения на следующем этапе следует изучить последовательное извлечение тяжелых металлов с исследованием процессов конкуренции между сосуществующими тяжелыми металлами в различных реальных почвах.

3) Из-за действительно сложных почв практическое применение может столкнуться с некоторыми дополнительными препятствиями.

Наиболее инновационные и перспективные наноматериалы и связанные с ними композиты на основе биочара, скорее всего, станут реальной альтернативой в краткосрочной перспективе. Помимо композитов на основе оксида металла, не остался незамеченным для применения с целью очистки почв, огромный потенциал металлоорганических каркасов (MOF). MOF обеспечивают большое семейство микромезопористых кристаллических

материалов с высоко настраиваемыми характеристиками, такими как чрезвычайно большие площади поверхности (>5000 $м^2/г^{-1}$) [4]. Эти свойства могут сыграть значительную роль в снижении содержания тяжелых металлов в загрязненной почве. Использование более экологичных методов предпочтительно, поскольку образующиеся отходы в процессе синтеза устойчиво минимизируются. Использование зеленого подхода для синтеза может открыть новый путь для устранения риска воздействия агрессивных реагентов на экосистемы. Настоятельно рекомендуется зеленый синтез, включающий использование обильных природных материалов.

Крупномасштабная подготовка композитов на основе биочара по-прежнему является дорогостоящей и трудоемкой. Следовательно, подхода “чем больше, тем лучше” следует избегать с экономической точки зрения. Кроме того, такой подход может привести к трате ресурсов и истощению реагентов. Существует всего несколько крупномасштабных подходов к получению композитов, в то время как большинство процессов являются громоздкими и требуют использования дорогостоящих реагентов. К сожалению, остаются проблемы с внедрением эффективного, экономичного и своевременного удаления ТМ в практических системах. Кроме того, следует тщательно изучить оценку затрат в практическом масштабе, чтобы подчеркнуть преимущества биочара. В результате создание долгосрочных крупномасштабных систем удаления тяжелых металлов, в которых в качестве поправки используются нанокомпозиты на основе биочара, может повысить экономический потенциал. Несмотря на то, что в последние годы были опубликованы различные исследования о нанокомпозитах биочара в качестве сорбентов тяжелых металлов, попытки улучшить тактику эксплуатации и создать масштабируемые системы удаления тяжелых металлов по-прежнему отсутствуют. Это препятствует коммерциализации сорбентов на основе нанокомпозитов на основе биочара для удаления ТМ из почв и должно быть в центре внимания будущих исследований.

Выводы

Проблемы окружающей среды и природных ресурсов побудили к поиску возобновляемых источников энергии в качестве долгосрочного подхода, охватывающего восстановление окружающей среды. В этом обзоре рассматривается, как профессия почвоведа может наилучшим образом успешно решать проблемы, связанные с недавно установленными ООН целями устойчивого развития по более экологичному восстановлению загрязненных почв. Биомасса – это ресурс, который можно пополнять. Недавнее исследование показало, что термохимическое превращение отходов биомассы в биомасло, которое может быть использовано в качестве замены ископаемого топлива, является практичным и устойчивым вариантом. Пиролиз – это эффективный способ превращения биомассы в жидкое

биомасло и твердый древесный уголь. Биочары считаются устойчивыми стабилизаторами, поскольку они получены из отходов пиролизной биомассы. Полученный биочар является пористым, с большой удельной поверхностью и высокой концентрацией гидрофильных групп. Биочар может быть использован для улучшения почвы, восстановления окружающей среды, утилизации отходов и очистки воды. Наноразмерные металлы, нанесенные на биочар, могут повысить его эффективность в деле удаления тяжелых металлов.

Знания о подходах, которые будут использоваться при внедрении биочара в загрязненные тяжелыми металлами почвы, все еще недостаточны. Стандартов применения не существует, поэтому необходимо создать нормативную базу для применения биочара для обеспечения безопасности применения, осуществления эффективных восстановительных работ и защиты безопасности пищевых продуктов и здоровья человека; необходимо также учитывать долгосрочные последствия применения биочара для загрязненных тяжелыми металлами почв, неблагоприятное воздействие биочара на почвенную экосистему и обеспечение эффективных методов смягчения негативных воздействий. Будущие безопасные и экономически эффективные методы, а также открытия в области производства биочаров, пригодных для использования по назначению, могут повысить их эффективность в восстановлении почв.

Понимание того, как изготавливать нанокомпозиты из биочара, и как удаляются тяжелые металлы, имеет решающее значение для их использования. Представляется возможным прямое (например, электростатическая адсорбция, ионный обмен, комплексообразование и осаждение) и косвенное (например, путем изменения параметров почвы, таких как pH, ЦИК, содержание минералов и органического углерода, и, следовательно, связей металла с почвой) взаимодействие между биочаром и тяжелыми металлами. Условия окружающей среды (pH, тип почвы и другие составляющие) и технологические методы влияют на эффективность удаления тяжелых металлов и должны быть идеально обработаны для повышения стабильности и долговечности нанокомпозитов на основе биочара. Существуют различные реальные примеры использования нанокомпозитов биочара для восстановления загрязненной почвы. Однако необходимо проделать большую работу по запуску полномасштабных систем, чтобы сделать технологию более практичной и надежной.

Исследование выполнено при поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ по поддержке молодежной лаборатории “Агробиотехнологии для повышения плодородия почв и качества сельскохозяйственной продукции” в рамках программы развития

межрегионального научно-образовательного центра Юга России, # ЛабНОЦ-21-01АБ.

Список литературы

1. Anae, J.; Ahmad, N.; Kumar, V.; Thakur, V.K.; Gutierrez, T.; Yang, X.J.; Cai, C.; Yang, Z.; Coulon, F. Recent advances in biochar engineering for soil contaminated with complex chemical mixtures: Remediation strategies and future perspectives //Science of the Total Environment, 2021. V. 767. P. 144351, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144351.
2. Anastas, P.T.; Zimmerman, J.B. The United Nations sustainability goals: How can sustainable chemistry contribute? //Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2018. V. 13. P. 150-153, doi:10.1016/j.cogsc.2018.04.017.
3. Arabyarmohammadi, H.; Darban, A.K.; Abdollahy, M.; Yong, R.; Ayati, B.; Zirakjou, A.; van der Zee, S.E. Utilization of a Novel Chitosan/Clay/Biochar Nanobiocomposite for Immobilization of Heavy Metals in Acid Soil Environment. //Journal of Polymers and the Environment, 2018. V. 26. №. 5. P. 2107-2119, doi:10.1007/s10924-017-1102-6.
4. Baumann, A.E.; Burns, D.A.; Liu, B.; Thoi, V.S. Metal-organic framework functionalization and design strategies for advanced electrochemical energy storage devices //Communications Chemistry, 2019. V. 2. P. 1–14, doi:10.1038/s42004-019-0184-6.
5. Beiyuan, J.; Awad, Y.M.; Beckers, F.; Wang, J.; Tsang, D.C.W.; Ok, Y.S.; Wang, S.L.; Wang, H.; Rinklebe, J. (Im)mobilization and speciation of lead under dynamic redox conditions in a contaminated soil amended with pine sawdust biochar //Environment international., 2020. V. 135. P. 105376, doi:10.1016/j.envint.2019.105376.
6. Chatterjee, R.; Sajjadi, B.; Chen, W.Y.; Mattern, D.L.; Hammer, N.; Raman, V.; Dorris, A. Effect of Pyrolysis Temperature on PhysicoChemical Properties and Acoustic-Based Amination of Biochar for Efficient CO2 Adsorption //Frontiers in Energy Research, 2020. V. 8. P. 85. doi:10.3389/fenrg.2020.00085.
7. Chausali, N.; Saxena, J.; Prasad, R. Nanobiochar and biochar based nanocomposites: Advances and applications //Journal of Agriculture and Food Research, 2021. V. 5. P. 100191, doi:10.1016/j.jafr.2021.100191.
8. Chen, D.; Wang, X.; Wang, X.; Feng, K.; Su, J.; Dong, J. The mechanism of cadmium sorption by sulphur-modified wheat straw biochar and its application cadmium-contaminated soil //Science of The Total Environment., 2020. V. 714. P. 136550, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.136550.
9. Chen, M.; Wang, D.; Xu, X.; Zhang, Y.; Gui, X.; Song, B.; Xu, N. Biochar nanoparticles with different pyrolysis temperatures mediate cadmium transport

in water-saturated soils: Effects of ionic strength and humic acid. //Science of The Total Environment., 2022. V. 806. P. 150668, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150668.
10. Elleby, C.; Domínguez, I.P.; Adenauer, M.; Genovese, G. Impacts of the COVID-19 Pandemic on the Global Agricultural Markets //Environmental and Resource Economics, 2020. V. 76. №. 4. P. 1067-1079, doi:10.1007/s10640-020-00473-6.
11. Fan, J.; Chen, X.; Xu, Z.; Xu, X.; Zhao, L.; Qiu, H.; Cao, X. One-pot synthesis of nZVI-embedded biochar for remediation of two mining arsenic-contaminated soils: Arsenic immobilization associated with iron transformation //Journal of Hazardous Materials, 2020. V. 398. P. 122901, doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122901.
12. He, L.; Zhong, H.; Liu, G.; Dai, Z.; Brookes, P.C.; Xu, J. Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China //Environmental pollution, 2019. V. 252. P. 846-855, doi:10.1016/j.envpol.2019.05.151.
13. Ho, S.H.; Zhu, S.; Chang, J.S. Recent advances in nanoscale-metal assisted biochar derived from waste biomass used for heavy metals removal. //Bioresource technology, 2017. V. 246. P. 123-134, doi:10.1016/j.biortech.2017.08.061.
14. Huang, H.; Reddy, N.G.; Huang, X.; Chen, P.; Wang, P.; Zhang, Y.; Huang, Y.; Lin, P.; Garg, A. Effects of pyrolysis temperature, feedstock type and compaction on water retention of biochar amended soil //Scientific Reports, 2021. V. 11. №. 1. P. 1-19, doi:10.1038/s41598-021-86701-5.
15. Huang, J.; Guo, S.; Zeng, G. ming; Li, F.; Gu, Y.; Shi, Y.; Shi, L.; Liu, W.; Peng, S. A new exploration of health risk assessment quantification from sources of soil heavy metals under different land use //Environmental pollution, 2018. V. 243. P. 49-58, doi:10.1016/j.envpol.2018.08.038.
16. Ippolito, J.A.; Cui, L.; Kammann, C.; Wrage-Mönnig, N.; Estavillo, J.M.; Fuertes-Mendizabal, T.; Cayuela, M.L.; Sigua, G.; Novak, J.; Spokas, K.; et al. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review //Biochar, 2020. P. 1-18, doi:10.1007/s42773-020-00067-x.
17. Ji, X.; Abakumov, E.; Xie, X.; Wei, D.; Tang, R.; Ding, J.; Cheng, Y.; Chen, J. Preferential Alternatives to Returning All Crop Residues as Biochar to the Crop Field? A Three-Source 13C and 14C Partitioning Study //Journal of agricultural and food chemistry, 2019. V. 67. №. 41. P. 11322-11330, doi:10.1021/acs.jafc.9b03323.
18. Khalid, S.; Shahid, M.; Niazi, N.K.; Murtaza, B.; Bibi, I.; Dumat, C. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils //Journal of Geochemical Exploration, 2017. V. 182. P. 247-268, doi:10.1016/j.gexplo.2016.11.021.

19. Khan, S.; Cao, Q.; Zheng, Y.M.; Huang, Y.Z.; Zhu, Y.G. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China //Environmental pollution, 2008. V. 152. №. 3. P. 686-692, doi:10.1016/j.envpol.2007.06.056.
20. Khawkomol, S.; Neamchan, R.; Thongsamer, T.; Vinitnantharat, S.; Panpradit, B.; Sohsalam, P.; Werner, D.; Mrozik, W. Potential of biochar derived from agricultural residues for sustainable management //Sustainability, 2021. V. 13. №. 15. P. 8147, doi:10.3390/su13158147.
21. Klenert, D.; Funke, F.; Mattauch, L.; O'Callaghan, B. Five Lessons from COVID-19 for Advancing Climate Change Mitigation //Environmental and Resource Economics, 2020. V. 76. №. 4. P. 751-778, doi:10.1007/s10640-020-00453-w.
22. Liang, L.; Xi, F.; Tan, W.; Meng, X.; Hu, B.; Wang, X. Review of organic and inorganic pollutants removal by biochar and biochar-based composites //Biochar, 2021. V. 3. №. 3. P. 255-281, doi:10.1007/s42773-021-00101-6.
23. Liu, J.; Liu, Y.J.; Liu, Y.; Liu, Z.; Zhang, A.N. Quantitative contributions of the major sources of heavy metals in soils to ecosystem and human health risks: A case study of Yulin, China //Ecotoxicology and environmental safety, 2018. V. 164. P. 261-269, doi:10.1016/j.ecoenv.2018.08.030.
24. Liu, Y.; Huang, J.; Xu, H.; Zhang, Y.; Hu, T.; Chen, W.; Hu, H.; Wu, J.; Li, Y.; Jiang, G. A magnetic macro-porous biochar sphere as vehicle for the activation and removal of heavy metals from contaminated agricultural soil //Chemical Engineering Journal, 2020. V. 390. P. 124638, doi:10.1016/j.cej.2020.124638.
25. Lu, H.P.; Li, Z.A.; Gascó, G.; Méndez, A.; Shen, Y.; Paz-Ferreiro, J. Use of magnetic biochars for the immobilization of heavy metals in a multi-contaminated soil //Science of the Total Environment, 2018. V. 622. P. 892-899, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.056.
26. Mandal, S.; Pu, S.; Adhikari, S.; Ma, H.; Kim, D.H.; Bai, Y.; Hou, D. Progress and future prospects in biochar composites: Application and reflection in the soil environment //Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2021. V. 51. №. 3. P. 219-271, doi:10.1080/10643389.2020.1713030.
27. Mandal, S.; Pu, S.; He, L.; Ma, H.; Hou, D. Biochar induced modification of graphene oxide & nZVI and its impact on immobilization of toxic copper in soil //Environmental Pollution, 2020. V. 259. P. 113851, doi:10.1016/j.envpol.2019.113851.
28. Mandal, S.; Pu, S.; Shangguan, L.; Liu, S.; Ma, H.; Adhikari, S.; Hou, D. Synergistic construction of green tea biochar supported nZVI for immobilization of lead in soil: A mechanistic investigation //Environment international, 2020. V. 135. P. 105374, doi:10.1016/j.envint.2019.105374.
29. Minkina, T., Mandzhieva, S., Chapligin, V., Motuzova, G., Sushkova, S., Fedorov, Y., Kolesnikov, S., Bauer, T. Accumulation and distribution of heavy

metals in plants within the technogenesis zone //Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ), 2014. V. 13. №. 5. P. 1307-1315
30. O'Riordan, T.J.C. UN Sustainable Development Goals: How can sustainable/green chemistry contribute? The view from the agrochemical industry //Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2018. V. 13. P. 158-163, doi:10.1016/j.cogsc.2018.06.014.
31. Oni, B.A.; Oziegbe, O.; Olawole, O.O. Significance of biochar application to the environment and economy //International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 2019. V. 8. №. 1. P. 1-13, doi:10.1016/j.aoas.2019.12.006.
32. Poliakoff, M.; Licence, P.; George, M.W. UN sustainable development goals: How can sustainable/green chemistry contribute? By doing things differently //Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2018. V. 13. P. 146-149, doi:10.1016/j.cogsc.2018.04.011.
33. Qian, W.; Liang, J.Y.; Zhang, W.X.; Huang, S.T.; Diao, Z.H. A porous biochar supported nanoscale zero-valent iron material highly efficient for the simultaneous remediation of cadmium and lead contaminated soil //Journal of Environmental Sciences, 2022. V. 113. P. 231-241, doi:10.1016/j.jes.2021.06.014.
34. Reyhanitabar, A.; Farhadi, E.; Ramezanzadeh, H.; Oustan, S. Effect of pyrolysis temperature and feedstock sources on physicochemical characteristics of biochar //Journal of Agricultural Science and Technology, 2020. V. 22. №. 2. P. 547-561.
35. Sarwar, N.; Imran, M.; Shaheen, M.R.; Ishaque, W.; Kamran, M.A.; Matloob, A.; Rehim, A.; Hussain, S. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives //Chemosphere, 2017. V. 171. P. 710-721, doi:10.1016/j.chemosphere.2016.12.116.
36. Tomczyk, A.; Sokołowska, Z.; Boguta, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects //Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2020. V. 19. №. 1. P. 191-215, doi:10.1007/s11157-020-09523-3.
37. United Nations Sustainable Development Goal 6 synthesis report on water and sanitation; 2018;
38. Water-reuse, B.C.; Delagah, S. Engineered Biochar Production and Its Potential Agriculture System, 2020.
39. Woolf, D.; Amonette, J.E.; Street-Perrott, F.A.; Lehmann, J.; Joseph, S. Sustainable biochar to mitigate global climate change //Sustainable biochar to mitigate global climate change. Nat. Commun., 2010. V. 1. №. 56. P. 1, doi:10.1038/ncomms1053.
40. Xie, T.; Reddy, K.R.; Wang, C.; Yargicoglu, E.; Spokas, K. Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: A review //Critical

Reviews in Environmental Science and Technology, 2015. V. 45. №. 9. P. 939-969, doi:10.1080/10643389.2014.924180.

41. Yaashikaa, P.R.; Kumar, P.S.; Varjani, S.; Saravanan, A. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy //Biotechnology Reports, 2020. P. e00570, doi:10.1016/j.btre.2020.e00570.
42. Yu, Z.; Zhou, L.; Huang, Y.; Song, Z.; Qiu, W. Effects of a manganese oxide-modified biochar composite on adsorption of arsenic in red soil //Journal of environmental management, 2015. V. 163. P. 155-162.
43. Zahed, M.A.; Salehi, S.; Madadi, R.; Hejabi, F. Biochar as a sustainable product for remediation of petroleum contaminated soil //Current Research in Green and Sustainable Chemistry, 2021. P. 100055, doi:10.1016/j.crgsc.2021.100055.
44. Zhao, C.; Wang, B.; Theng, B.K.G.; Wu, P.; Liu, F.; Wang, S.; Lee, X.; Chen, M.; Li, L.; Zhang, X. Formation and mechanisms of nano-metal oxide-biochar composites for pollutants removal: A review //Science of the Total Environment, 2021. P. 145305, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145305.